



# 分散電力貯蔵装置が連系された配電システムの最適運用に関する研究

著者	阿部 政紀
号	59
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5062号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/62801">http://hdl.handle.net/10097/62801</a>

氏 名	あ べ ま さ の り 阿 部 政 紀
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 2 7 年 3 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気エネルギーシステム専攻
学 位 論 文 題 目	分散電力貯蔵装置が連系された配電システムの最適運用に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 斎藤 浩海
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 斎藤 浩海 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 津田 理 東北大学客員教授 七原 俊也

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

地球温暖化対策としての温室効果ガスの排出削減およびエネルギーのセキュリティ確保のための 1 次エネルギー源の多様化を目的として、再生可能エネルギー発電とともに電気自動車(Electric Vehicle : EV)の導入が進められており、将来の配電システムには多数の EV が今までに無い可動型の電力貯蔵装置として接続される。本論文では、配電システムに連系された多数の小型の電力貯蔵装置の総称を「分散電力貯蔵装置」と呼称している。太陽光発電(Photovoltaic generator : PV)の出力変動や、EV の分散電力貯蔵装置の充電が、将来の配電システムの電圧変動を増大させてしまうことが懸念されており、それらの機器が多数導入された場合にも、適正な電圧で電力供給を行うことが要求されている。また、東日本大震災では大規模災害に対する電力システムの脆弱性が露呈し、災害に強い「レジリエント」な電力システムの開発が望まれている。以上のような要求がなされている一方で、電気料金の低廉化を目的として電力市場が自由化されてきており、今後電力設備の増強に対する費用はより掛けにくくなることが予想されている。対策費を抑える方策の一つとして、配電ネットワークに連系された需要側の分散電力貯蔵装置を電力システムと協調して運用することが期待されており、分散電力貯蔵装置および PV 多数導入時の高品質な電力供給および災害時の電力供給維持を実現するための、最適な次世代配電システムの構成とその運用方法の開発が求められている。そこで、本研究の目的は、常に適正な電力品質を維持し、かつ災害時にも安定な電力供給を行うための最適潮流解析方法を活用し、分散電力貯蔵装置の運用の仕方を反映した配電システムの最適な運用方法を明らかにすることである。その目的を達成するために、最適潮流計算に分散電力貯蔵装置と配電システムの特徴を取り込み、実運用に適用するために十分高速な計算速度の解法を開発することが課題である。

### 第2章 最適潮流計算を活用した分散電力貯蔵装置連系配電システムの最適運用

本章では、将来 EV という可動型の分散電力貯蔵装置が多数連系した次世代配電システムの最適な運用方法について述べている。分散電力貯蔵装置連系配電システムの平常時と緊急時の運用について、従来の配電システムの運用法と比較した上で新たに必要と考えられる運用方法を述べている。平常時では、EV の急速充電という 1 台あたり最大 50kW 程度の大きな電力の充電の集中が配電システムの電圧変動を引き起こし、電力の品質を劣化させるという問題を指摘し、その解決策として配電システム運用者が電圧調整装置を導入する方策と、急速充電を同時に行える EV 台数を調整する

方策の得失を述べている。また災害などによって大規模電源からの電力供給が停止した緊急時では、分散電源と EV の電力貯蔵機能を活用した配電システムの自立運転の可能性を指摘し、安全上の課題を述べている。さらに、それらの運用問題の解決に最適潮流計算法の応用が重要であることを指摘している。その上で、最適潮流計算法の代表的問題と分散電力貯蔵装置連系配電システムに最適潮流計算を応用する際に要求される課題について述べている。

### 第3章 配電電圧適正化のための電気自動車急速充電負荷の最適配置法

本章では、平常時の配電システムにおいて、多数の EV が急速充電を行うことによる電圧品質劣化問題を解決するため、配電ネットワーク上に分散配置された急速充電器を最適に運用する方法を提案している。その運用方法は、配電ネットワークに接続された急速充電器のうちの使用可能な台数の配置を決定し、その情報を利用して運転者を空き充電器に誘導することで、急速充電が配電ネットワークに与える負荷を時間的、空間的に分散するというものである。使用可能急速充電器台数の最適な配置を決定する問題を、配電電圧を適正範囲に維持しつつ使用可能な充電器の台数を最大化することを目的関数とした最適潮流計算の問題として定式化した。提案した運用方法では、リアルタイムで急速充電器の台数を決定するための高速解法が必要となる。解の探索の高速性を達成するために、電力回路の性質と線形計画法を活用した最適潮流計算法を開発した。その方法の妥当性を、図1の小規模の電圧階級 6.6kV の高压配電システムモデルにおいて検証した結果、全数探索の 18.8 倍の速さで最適解を求めることができた。また、PV が引き起こす瞬時の電圧変動に対して、PV 出力変動のワーストケースを想定して使用可能な急速充電器の台数を決定することで PV の不確実性に対処する運用方法を提案している。その運用方法を最適潮流問題の定式化に組み込み、適切に使用可能充電器を決定できることを配電システムモデルにおいて検証した。

さらに、複数の配電ネットワーク間の接続構成を切り替えて電力負荷の配分を変えることによって、より多くの充

電器を使用できるようになることに着目し、最適な接続構成も考慮できる急速充電負荷の配置法を開発した。図2の複数フィーダからなる配電ネットワークに考案法を応用した結果、接続構成の切り替えを取り入れない場合には、急速充電器 114 台中の使用可能な台数は 102 台であったが、接続構成を取り入れた場合には 114 台に増加し、考案法の有効性を確認できた。以上の検討の結果、考案法は、最適な急速充電器の運用方法を高速かつ高精度に決定できることを明らかにした。提案した運用方法は EV が普及した配電システムの電圧適正化方策の基礎となるものである。

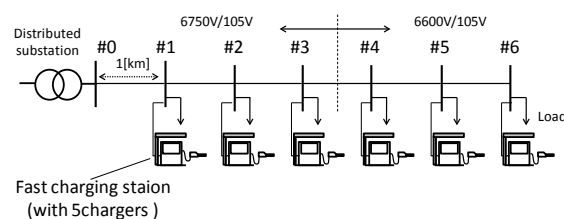


図1 6.6kV 小規模配電ネットワークモデル

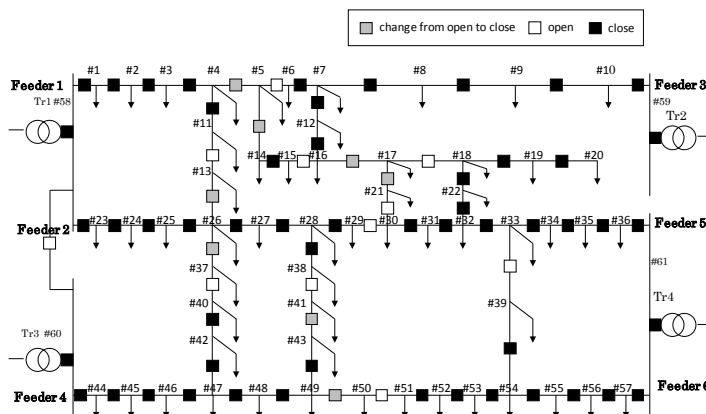


図2 6 フィーダからなる配電ネットワークモデル

### 第4章 分散電力貯蔵装置を活用した自立運転配電システムのための最適運用

本章では、大規模電源が長時間停止した緊急時において、分散貯蔵装置を活用した電力供給を行うための配電システ

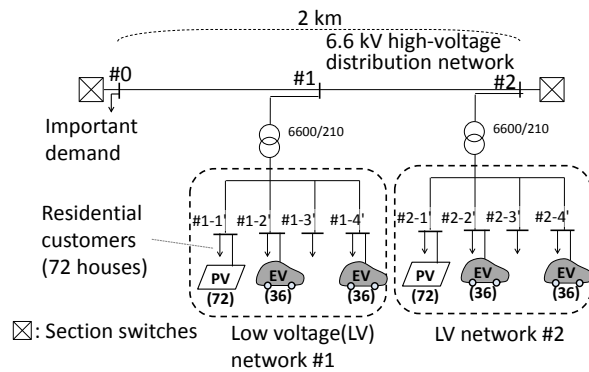


図3 緊急時自立運転配電ネットワーク(IDN)のモデル

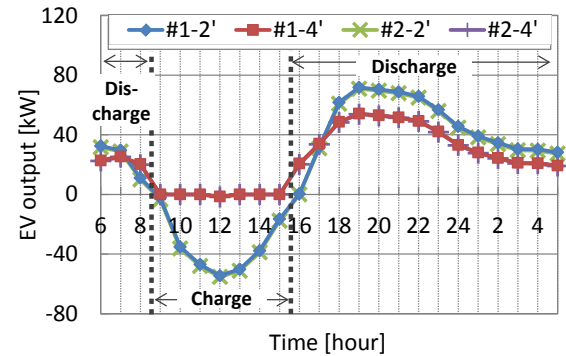
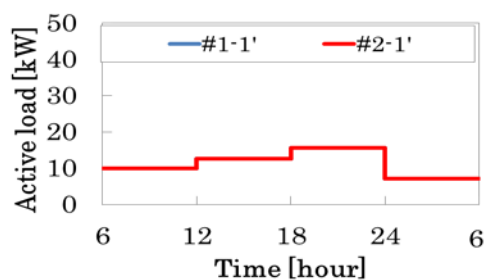


図4 バッテリ充放電電力の時間変化（放電が正）

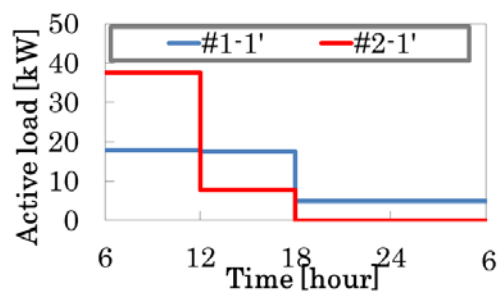
ムの最適運用について論じている。現状の配電設備の構成を活かした電力供給方法として、EV の電力貯蔵機能と PV および健全な配電設備を活用して電力供給を行う自立運転配電ネットワーク(Islanded Distribution Network : IDN)の最適な需給運用方法を提案している。はじめに、このような電力供給方法の実現に必要なハードウェアの構成および技術的課題を挙げ、また自立運転を実現するための配電システムの最適な運用方法と制御システムの構成について述べている。そして、提案する需給運用の計画方法は、最適潮流計算に基づいた分散電力貯蔵装置の充放電電力スケジュールを決定するものである。最適な需給運用の基本的な考え方として、IDN はエネルギーの供給源が限られた電力システムであるため、より長時間供給するためにはエネルギー損失の最小化が重要である。そこで提案法では、適正な電圧を保ちつつ電力貯蔵装置の充放電サイクル損失および配電損失の最小化を達成することを目的として、分散電力貯蔵装置の貯蔵電力量の時間依存性の特性を反映させている。この最適潮流計算法の妥当性を確認するため、図3の東北地域の実高圧配電線1区間の平均的な長さである2[km]のIDNのモデルに適用した結果、図4に示したように自立運転時の分散電力貯蔵装置の充放電スケジュールを決定可能であることを示した。ただし、PV およびEV だけでは供給力が十分でなく、期待するほどの日数の供給が困難であることが明らかになった。

## 第5章 負荷制御を含む自立運転配電システムの最適運用

本章では、第4章の結果を基に、IDN 内の供給力が不足している場合には需要家の電力負荷需要の制御を含む需給運用の計画方法が必要であることを述べ、負荷需要の時間的シフト(以下、ロードシフト)のスケジュールを新たに取り入れたIDNの需給運用方法を提案している。4章で開発した最適潮流計算の結果から得られるラグランジュ乗数を用いることによって、ロードシフトに対するエネルギー損失の感度分析を行うことができる。その結果として、ロードシフトによって消費電力の総量を変えずにエネルギー損失の低減効果を得ることを確認した。そこで、ロードシフトを含んだ最適な需給運用計画を最適潮流計算から決定するために、第4章で開発した問題において負荷需要の曲線を決定変数へと変更し、ロードシフトに関する等式制約を加えた。決定変数の増加によって解の探索が困難になるという問題を解消するため、新しい解法として最適潮流計算から得られるラグランジュ乗数を活用した反復解法を開発した。考案した方法の妥当性の検証のためIDNモデルに適用した。本章における解析では、検討を容易にするために24時間を4つの時間断面に簡易化した。図5はロードシフト前後における負荷曲線である。18時から翌日の6時までの夜間の負荷が6時から18時までの日中にシフトされたことが分かる。このロードシフトはPVの余剰電力が発生する時間帯に多くの負荷機器を使用し、分散電力貯蔵装置の充放電サイクル回数を減少させている。その結果、充放電サイクルによるエネルギー損失は187.99[kWh/日]から46.37[kWh/日]に最小化することができ、より長時間の電力供給が行えることが明らかになった。考案したIDNの需給運用方法は、災害時に健全な設備を活用した電力供給を行い、極力停電を少なくする



(a) ロードシフトをしない場合の初期負荷曲線



(b) ロードシフトを行う場合の最適な負荷曲線

図5 ロードシフト前後の負荷曲線

ようなレジリエントな電力システム構築の基礎を与える方法である。

## 第6章 結論

本論文は、EV という可動型の電力貯蔵装置が多数導入された配電システムにおいて起こりうる平常時の電圧変動問題と緊急時の電力供給問題を明らかにし、それらの問題に対して分散電力貯蔵装置を有効に活用した配電システムの最適な運用方法を提案した。さらに、その最適運用を実現するための道具として最適潮流計算法の重要性を指摘した上で、最適潮流計算に基づいた基礎的な解析手法を提案しており、EV が普及したときに常に安定な電圧を維持し、大規模災害時にも電力供給を行うレジリエントな配電システムを実現する運用方法の基礎を与えている。

今後の課題として、不確実な PV 出力予測の下で長時間の持続的な供給を行うための IDN の需給運用方法を考案することが特に重要である。考案した運用方法が確立されれば、マイクログリッドにおける需給運用にも応用できると考えられる。また、考案した運用方法は、スマートメータおよび HEMS が各世帯に導入されて新たな情報通信ネットワークが構築されれば、得られた情報を用いることで重要な電力需要に対してきめ細やかな需給運用が可能になるであろう。

# 論文審査結果の要旨

将来の配電システムでは、電気自動車（Electric Vehicle, EV）という可動型の分散電力貯蔵装置の急速充電が電圧変動の増大を招く重要な問題になると予想される。一方で大規模自然災害時の停電回避のため、被害を免れた EV や需要側の太陽光発電装置（Photovoltaic generation, PV）などを活用する電力供給方策の確立も重要である。本論文では、これらを問題点として取り上げ、それらの解決策として分散電力貯蔵装置を活用する配電システムの最適運用法を提案し、その実現のための解析手法として考案した最適潮流計算法の有効性を明らかにしたもので、全編 6 章より成る。

第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、EV が普及したときに、その急速充電が平常時の配電システムの電圧変動を引き起こすという問題を指摘し、その解決策としての配電システムへ電圧調整装置を導入する方策と、急速充電を行う EV の台数を調節する方策の得失を述べている。また災害などで大規模電源が停止した緊急時に、分散電源と EV を利用した配電システムの自立運転の可能性と安全上の課題を述べている。さらに、多数の分散電力貯蔵装置が接続された配電システムの運用問題の解決に従来の最適潮流計算法の枠組みが応用可能であることを指摘している。

第 3 章では、多数の EV による急速充電が平常時の 6.6 kV 配電システムの電圧を変動させる問題を、分散設置された急速充電器の最適運用により解決する方法を提案している。提案の運用方法は、配電電圧を適正範囲に保ちつつ使用可能な急速充電器の台数を最大化するという整数計画問題の解として明らかにできるが、リアルタイムで急速充電器を運用するため高速な解法が必要となる。本章では、その解法として、電力回路の性質と線形計画法を応用した新しい最適潮流計算法を考案し、その妥当性を小規模配電システムモデルにより検討している。その結果、考案した計算法により急速充電器の最適運用を高速かつ高精度に決定できることを明らかにしている。これは EV が普及した将来の配電システムにおける電圧安定化方策の基礎となる重要な成果である。

第 4 章では、大規模電源が長時間停止した緊急時に、EV などの分散電力貯蔵装置と PV および健全な配電設備を活用して電力供給を行う自立運転配電ネットワーク（Islanded Distribution Network, IDN）の最適な需給運用方法を提案している。提案方法は、電圧適正化および EV の充放電サイクル損失と配電損失の最小化を達成する EV の充放電スケジュールが、電力貯蔵量の時間依存性を反映させた最適潮流計算法により得られることに基づいている。提案方法の妥当性を東北管内の実配電線の平均的長さをを用いた IDN モデルにより検討した結果、電圧品質を保ち、かつ PV の発生電力を負荷に安定に供給するための EV の最適充放電スケジュールが高精度で得られることが分かった。これは IDN の安定運転の実現に有用な成果である。

第 5 章では、前章で述べた IDN の需給運用の時間を延長させるため、負荷需要の時間的シフトを新たに導入した IDN の最適需給運用法を提案している。IDN の運用時間を延長可能にする負荷シフト量は、前章で述べた最適潮流計算法において負荷需要を決定変数として扱うことにより求められるが、決定変数の増加により解探索が困難となるため、最適潮流計算で得られるラグランジュ乗数を活用した新しい計算法を考案している。考案法を IDN モデルに適用した結果、負荷需要の時間的シフトにより分散電力貯蔵装置の充放電サイクル損失が減少し、電力供給の長時間化が図れることが明らかになった。これは IDN の長時間運用を可能にするための重要な知見である。

第 6 章は結論である。

以上要するに本論文は、多数の分散電力貯蔵装置が連系された将来の配電システムで発生し得る平常時の電圧変動問題と緊急時の電力供給問題を明らかにし、それらを解決する配電システムの運用方法およびそれを実現するための基礎解析手法を提案したもので、電力システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。